

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-46127

(P2003-46127A)

(43) 公開日 平成15年2月14日 (2003.2.14)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	ターミナル* (参考)
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 4 M 1 0 4
			E 5 F 0 4 1
21/28	3 0 1	21/28	3 0 1 B

審査請求 有 請求項の数16 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2002-145793 (P2002-145793)

(22) 出願日 平成14年5月21日 (2002.5.21)

(31) 優先権主張番号 特願2001-153418 (P2001-153418)

(32) 優先日 平成13年5月23日 (2001.5.23)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000001889
三洋電機株式会社
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号

(72) 発明者 畑 雅幸
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三
洋電機株式会社内

(72) 発明者 野村 康彦
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三
洋電機株式会社内

(74) 代理人 100104433
弁理士 宮國 博一

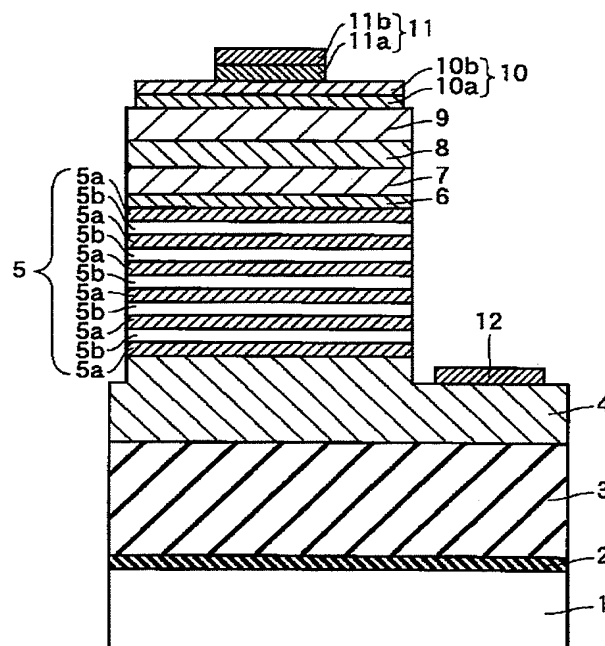
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物系半導体発光素子

(57) 【要約】

【課題】 低い駆動電圧で均一な発光を得ることが可能な窒化物系半導体発光素子を提供する。

【解決手段】 サファイア基板1上に形成されたn型コンタクト層4と、n型コンタクト層4上に形成され、窒化物系半導体 (Ga NおよびGa_{0.85} In_{0.35} N) からなるMQW発光層5と、MQW発光層5上に形成され、窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層 (Ga_{0.85} In_{0.15} N) からなるp型コンタクト層9と、p型コンタクト層9上に形成され、透光性を有するp側電極10とを備える。



【特許請求の範囲】

【請求項1】基板上に形成された第1導電型の第1窒化物系半導体層と、

前記第1窒化物系半導体層上に形成され、窒化物系半導体からなる発光層と、

前記発光層上に形成され、窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層を含む第2導電型のコンタクト層と、

前記コンタクト層上に形成され、透光性を有する電極とを備えた、窒化物系半導体発光素子。

【請求項2】前記第2導電型のコンタクト層のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上である、請求項1に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項3】前記第2導電型のコンタクト層は、窒化ガリウムインジウムを含む、請求項1または2に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項4】前記透光性を有する電極は、ニッケル、パラジウム、白金および金からなるグループより選択される少なくとも1つの材料を含む、請求項1～3のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項5】前記透光性を有する電極は、光を透過可能な厚みで形成されている、請求項1～4のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項6】前記透光性を有する電極は、1.0nm以下の厚みを有する、請求項5に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項7】前記透光性を有する電極は、光を透過可能な間隙を有するように形成されている、請求項1～4のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項8】前記透光性を有する電極の前記間隙が形成される領域は、光を透過可能な厚みで形成されており、前記透光性を有する電極の前記間隙以外の領域は、光を透過可能な厚みよりも大きい厚みで形成されている、請求項7に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項9】前記光を透過可能な間隙が形成される領域には、前記透光性を有する電極が形成されておらず、前記透光性を有する電極の前記間隙以外の領域は、光を透過可能な厚みよりも大きい厚みで形成されている、請求項7に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項10】前記第1導電型の第1窒化物系半導体層は、窒化ガリウムを含む、請求項1～9のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項11】前記発光層は、窒化ガリウムインジウムを含む、請求項1～10のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項12】前記第1窒化物系半導体層は、基板上にバッファ層を介して形成されている、請求項1～11のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項13】前記基板は、サファイア基板、スピネル基板、Si基板、SiC基板、GaAs基板、GaP基

板、InP基板、水晶基板、ZrB₂基板およびGaN基板からなるグループより選択される1つの基板を含む、請求項1～12のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項14】前記発光層と前記第2導電型のコンタクト層との間に形成され、窒化物系半導体からなる第2導電型の第2窒化物系半導体層と、

前記発光層と前記第2導電型のコンタクト層との間の前記第2導電型の第2窒化物系半導体層上に形成され、窒化物系半導体からなる第2導電型の中間層とをさらに備え、

前記第2導電型の中間層は、

前記第2導電型のコンタクト層のバンドギャップと前記第2導電型の第2窒化物系半導体層のバンドギャップとの中間のバンドギャップを実質的に有する、請求項1～13のいずれか1項に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項15】前記第2導電型の第2窒化物系半導体層は、前記第2導電型のコンタクト層よりも大きなバンドギャップを有する、請求項14に記載の窒化物系半導体発光素子。

【請求項16】前記第2導電型の第2窒化物系半導体層は、窒化ガリウムアルミニウムからなる第2導電型のクラッド層を含む、請求項14または15に記載の窒化物系半導体発光素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、窒化物系半導体発光素子に関し、より特定的には、III族窒化物系半導体に代表される窒化物系半導体層を含む窒化物系半導体発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq X, 0 \leq Y, X+Y \leq 1$) からなる窒化物系半導体を用いられた紫外LED、青色LEDおよび緑色LEDが実用化されている。これらのLEDの基本的な構造としては、透明な絶縁性の基板上に、たとえば、n型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0 \leq Y \leq 1$) からなるn型窒化物系半導体層と、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq X \leq 1$) からなる発光層と、p型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq Z \leq 1$) からなるp型窒化物系半導体層とが順に積層されたダブルヘテロ構造を有する。

【0003】また、従来、上記のようなダブルヘテロ構造を有する窒化物系半導体発光素子において、発光観測面側となるp型窒化物系半導体層上に、発光層の発光を外部に取り出すための透光性の金属からなるp側電極を設けた構造が知られている。これらは、たとえば、特開平6-314822号公報に開示されている。

【0004】上記のような構造を有するLEDに用いられるp側電極およびn側電極は、順方向電圧を低下させるために、p側電極およびn側電極がそれぞれ接触する

10

20

30

40

50

p型窒化物系半導体層およびn型窒化物系半導体層と良好なオーミック接触を得る必要がある。このため、従来では、n側電極として、n型窒化物系半導体層と良好なオーミック接触を示すTiおよびAlを含む電極を用いていた。また、透光性を有するp側電極として、p型窒化物系半導体層と良好なオーミック接触を示すNiおよびAuを含む電極を用いていた。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】上記した従来のp型窒化物系半導体層上に透光性を有するp側電極を形成する場合、LEDの順方向電圧を下げるために、p側電極の厚みを厚くして電気抵抗を下げる必要があった。しかしながら、上記のように、p側電極の厚みを厚くすると、紫外光、青色光および緑色光に対するp側電極の透過率が低下するという不都合があった。このため、p側電極から取り出される光の発光強度が低下するという問題点があった。

【0006】また、p側電極の透過率を向上させるために、p側電極の厚みを薄くすると、p側電極のシート抵抗が大きくなるので、p側電極とp型窒化物系半導体層との間のコンタクト抵抗が大きくなる。このため、p側電極からp型窒化物系半導体層に電流が均一に流れにくくなるので、均一な発光を得ることが困難になるという不都合が生じる。これによっても、発光強度が低下するという問題点があった。また、この場合に、発光強度の低下を防止しようとする、LEDの駆動電圧が高くなるという問題点もあった。

【0007】この発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、この発明の1つの目的は、低い駆動電圧で均一な発光を得ることが可能な窒化物系半導体発光素子を提供することである。

【0008】この発明のもう1つの目的は、上記の窒化物系半導体素子において、電極と窒化物系半導体層（コンタクト層）とのコンタクト抵抗を小さくすることである。

【0009】この発明のさらにもう1つの目的は、上記の窒化物系半導体素子において、透光性を有する電極のシート抵抗をより低減することである。

【0010】この発明のさらにもう1つの目的は、上記の窒化物系半導体素子において、コンタクト層とクラッド層とのバンドギャップの不連続を緩和することである。

【0011】

【課題を解決するための手段】この発明の一の局面による窒化物系半導体発光素子は、基板上に形成された第1導電型の第1窒化物系半導体層と、第1窒化物系半導体層上に形成され、窒化物系半導体からなる発光層と、発光層上に形成され、窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層を含む第2導電型のコンタクト層と、コンタクト層上に形成され、透光性を有する電

極とを備えている。

【0012】この一の局面による窒化物系半導体発光素子では、上記のように、窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層を含む第2導電型のコンタクト層を設けることによって、その窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層を含むコンタクト層では、窒化ガリウムからなるコンタクト層（窒化物系半導体層）よりも高いキャリア濃度を得ることができるので、コンタクト層と電極との界面に形成される障壁の厚さを薄くすることができる。これにより、コンタクト層と透光性を有する電極とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができる。また、窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層は、窒化ガリウムよりも電気伝導度が高いので、その窒化ガリウムよりもバンドギャップの小さい窒化物系半導体層内で電流が均一に広がりやすくなる。これにより、透光性を有する電極を薄い厚みで形成する場合にも、均一な発光を得ることができる。

【0013】上記一の局面による窒化物系半導体発光素子において、好ましくは、第2導電型のコンタクト層のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。このように構成すれば、コンタクト層と電極との界面に形成される障壁の厚さを薄くできるので、コンタクト層と透光性を有する電極とのコンタクト抵抗を容易に小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができる。また、駆動電圧を低くすることができる。

【0014】上記一の局面による窒化物系半導体発光素子において、好ましくは、第2導電型のコンタクト層のp型不純物濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。このように構成すれば、コンタクト層と電極との界面に形成される障壁の厚さを薄くできるので、コンタクト層と透光性を有する電極とのコンタクト抵抗を容易に小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができる。また、駆動電圧を低くすることができる。

【0015】上記一の局面による窒化物系半導体発光素子において、好ましくは、第2導電型のコンタクト層は、変調ドーピングされている。このように構成すれば、コンタクト層と電極との界面に形成される障壁の厚さを薄くできるので、コンタクト層と透光性を有する電極とのコンタクト抵抗を容易に小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができる。また、駆動電圧を低くすることができる。

【0016】また、上記の場合、好ましくは、第2導電型のコンタクト層は、窒化ガリウムインジウムを含む。このように構成すれば、容易にコンタクト層のバンドギャップを窒化ガリウムよりも小さくすることができる。

【0017】また、上記の場合、好ましくは、透光性を有する電極は、ニッケル、パラジウム、白金および金からなるグループより選択される少なくとも1つの材料を

10

20

30

40

50

含む。このように構成すれば、透光性を有する電極とコンタクト層との間で良好なオーミック接触を得ることができる。

【0018】また、上記の場合、好ましくは、透光性を有する電極は、光を透過可能な厚みで形成されている。このように構成すれば、容易に、電極に透光性を持たせることができる。

【0019】また、上記の場合、好ましくは、透光性を有する電極は、10 nm以下の厚みを有する。このように構成すれば、良好な透光性を有する電極を得ることができる。

【0020】また、上記の場合、好ましくは、透光性を有する電極は、光を透過可能な間隙を有するように形成されている。このように構成すれば、間隙以外の部分の厚みを厚くすることができるので、透光性を有する電極のシート抵抗をより低減することができる。この場合、透光性を有する電極の間隙が形成される領域は、光を透過可能な厚みで形成されているとともに、透光性を有する電極の間隙以外の領域は、光を透過可能な厚みよりも大きい厚みで形成されていてもよい。また、光を透過可能な間隙が形成される領域には、透光性を有する電極が形成されていないとともに、透光性を有する電極の間隙以外の領域は、光を透過可能な厚みよりも大きい厚みで形成されていてもよい。これらのように構成すれば、透光性を有する電極のシート抵抗をより低減することができる。

【0021】また、この場合、光を透過可能な間隙を有する電極は、網目状の電極を含んでいてもよい。また、光を透過可能な間隙を有する電極は、くし状の電極を含んでいてもよい。さらに、光を透過可能な間隙を有する電極は、ミアンダ (meander) 状の電極を含んでいてもよい。これらのように構成すれば、間隙により光の透過率を向上させることができるとともに、間隙以外の部分の厚みを厚くすることにより、透光性を有する電極のシート抵抗をより低減することができる。

【0022】また、上記の場合、好ましくは、第1導電型の第1窒化物系半導体層は、窒化ガリウムを含む。また、好ましくは、発光層は、窒化ガリウムインジウムを含む。

【0023】また、上記の場合、好ましくは、第1窒化物系半導体層は、基板上にバッファ層を介して形成されている。このように構成すれば、窒化物系半導体とは格子定数が異なる基板を用いた場合にも、第1窒化物系半導体層の転位を低減することができる。この場合、好ましくは、バッファ層は、低温バッファ層を含み、低温バッファ層上に、横方向成長により形成された低転位の第2窒化物系半導体層をさらに備え、第1窒化物系半導体層は、第2窒化物系半導体層上に形成されている。このように構成すれば、第1窒化物系半導体層の転位をより低減することができるので、発光効率をより向上させる

ことができる。

【0024】また、上記の場合、好ましくは、基板は、サファイア基板、スピネル基板、Si基板、SiC基板、GaAs基板、GaP基板、InP基板、水晶基板、ZrB₂基板およびGaN基板からなるグループより選択される1つの基板を含む。

【0025】また、上記の場合、好ましくは、発光層と第2導電型のコンタクト層との間に形成され、窒化物系半導体からなる第2導電型の第2窒化物系半導体層と、発光層と第2導電型のコンタクト層との間の第2導電型の第2窒化物系半導体層上に形成され、窒化物系半導体からなる第2導電型の中間層とをさらに備え、第2導電型の中間層は、第2導電型のコンタクト層のバンドギャップと第2導電型の第2窒化物系半導体層のバンドギャップとの中間のバンドギャップを実質的に有する。このように構成すれば、中間層によりコンタクト層と第2窒化物系半導体層とのバンドギャップの不連続を緩和することができるので、コンタクト層から第2窒化物系半導体層へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。また、この場合、第2導電型の第2窒化物系半導体層は、第2導電型のコンタクト層よりも大きなバンドギャップを有するようにしてもよい。

【0026】また、上記の場合、好ましくは、第2導電型の第2窒化物系半導体層は、窒化ガリウムアルミニウムからなる第2導電型のクラッド層を含む。このように構成すれば、上記窒化ガリウムアルミニウムを含むクラッド層に比べてアルミニウム組成が少ないまたはアルミニウムを含まない材料からなる中間層を窒化ガリウムアルミニウムを含むクラッド層上に形成することによって、成長時に、クラッド層の表面が変質するのを防止することができる。これにより、クラッド層の上面に、変質した高抵抗の層が形成されるのが防止されるので、コンタクト層からクラッド層へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。また、クラッド層の変質に起因する面内の抵抗のばらつきを低減することができるので、発光むらを低減することができる。これにより、均一な発光を得ることができる。

【0027】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。

【0028】(第1実施形態) 図1は、本発明の第1実施形態による発光ダイオード素子 (青色LEDチップ) を示した断面図である。また、図2は、図1に示した発光ダイオード素子 (青色LEDチップ) の上面図である。

【0029】まず、図1および図2を参照して、第1実施形態による発光ダイオード素子の構造について説明する。図1に示すように、サファイア基板1の(0001)面上に、約10 nmの膜厚を有するAlGaNから

なる低温バッファ層2および約 $1\mu\text{m}$ の膜厚を有するアンドープGaNからなる高温バッファ層3が順次形成されている。高温バッファ層3上には、約 $5\mu\text{m}$ の膜厚の凸部を有するSiドープGaNからなるn型コンタクト層4が形成されている。このn型コンタクト層4は、n型クラッド層を兼用するように形成されている。なお、サファイア基板1は、本発明の「基板」の一例であり、n型コンタクト層4は、「第1窒化物系半導体層」の一例である。

【0030】また、n型コンタクト層4の凸部の上面上のほぼ全面と接触するように、多重量子井戸(MQW)発光層5が形成されている。このMQW発光層5は、約 5nm の膜厚を有する6つのアンドープGaNからなる障壁層5aと、約 5nm の膜厚を有する5つのアンドープGa_{0.95}In_{0.05}Nからなる井戸層5bとが交互に積層された構造を有する。なお、MQW発光層5は、本発明の「発光層」の一例である。

【0031】MQW発光層5上には、MQW発光層5の結晶の劣化を防止するために、約 10nm の膜厚を有するアンドープGaNからなる保護層6が形成されている。保護層6上には、約 $0.15\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7と、約 $0.3\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープGaNからなるp型中間層8とがこの順序で形成されている。なお、p型クラッド層7は、本発明の「第2窒化物系半導体層」および「クラッド層」の一例であり、p型中間層8は、本発明の「中間層」の一例である。

【0032】そして、そのp型中間層8上には、約 $0.3\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の*

*ドーピング量および約 $8\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9が形成されている。なお、p型コンタクト層9は、本発明の「コンタクト層」の一例である。

【0033】ここで、GaNからなるp型中間層8は、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7のバンドギャップと、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有する。

【0034】p型コンタクト層9の上面上には、約 2nm の膜厚を有するPd膜10aと、約 4nm の膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10が形成されている。p側電極10は、透光性を有するように薄い厚み(合計膜厚約 6nm)で形成されている。なお、p側電極10は、本発明の「透光性を有する電極」の一例である。

【0035】また、図1および図2に示すように、p側電極10の上面上の一部には、約 30nm の膜厚を有するTi膜11aと、約 500nm の膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、p型コンタクト層9からn型コンタクト層4までの一部領域が除去されている。そのn型コンタクト層4の露出した表面には、約 500nm の膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0036】ここで、第1実施形態のGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9上に、p側電極10などの透光性のp側電極を形成する場合と、比較例としてのGaNからなるp型コンタクト層上に、p側電極10などの透光性のp側電極を形成する場合との、p側電極のシート抵抗を比較した結果を、以下の表1を参照して説明する。

【0037】

【表1】

電極材料	p側電極のシート抵抗(Ω/cm^2)	
	p型GaN層	p型GaInN層
Au(4nm)/Pd(2nm)	41.1	20.1
Ni(2nm)/Au(4nm)/Pd(2nm)	41.8	20.5
Pd(10nm)	∞	22.4

この実験では、4探針法を用いて、 0.8mm のプロープ間隔で、 10mA の電流を流した場合のp側電極のシート抵抗を測定した。また、透光性のp側電極の材料としては、第1実施形態のp側電極10と同様の構成を有するAu(4nm)/Pd(2nm)と、Ni(2nm)/Au(4nm)/Pd(2nm)と、Pd(10nm)との3種類の金属膜を用いた。

【0038】比較例のGaNからなるp型コンタクト層上にp側電極を形成した場合には、Au/Pdからなるp側電極およびNi/Au/Pdからなるp側電極において、 $41.1\Omega/\text{cm}^2$ および $41.8\Omega/\text{cm}^2$ と、

高いシート抵抗を示した。また、Pdからなるp側電極において、測定限界を超える高いシート抵抗を示した。

【0039】一方、第1実施形態のGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9上にAu/Pdからなるp側電極10を形成した場合には、 $20.1\Omega/\text{cm}^2$ の低いシート抵抗を示した。また、Ni/Au/Pdからなるp側電極およびPdからなるp側電極においても、約 $20\Omega/\text{cm}^2$ の低いシート抵抗を示した。このように、実験データから、第1実施形態において、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9を用いれば、p側電極10のシート抵抗が従来に比べて低くなることが

わかった。

【0040】また、第1実施形態の発光ダイオード素子において、p側パッド電極11とn側電極12との間に順方向電圧を印加することによって、約470nmの波長を有する青色領域の発光が得られた。また、比較例のGa_{0.95}Nからなるp型コンタクト層上にp側電極を形成した場合に比べて、発光強度が約2倍に向上することがわかった。

【0041】なお、上記の実験において、p側電極として100nmの厚い膜厚を有するPdを用いた場合には、比較例および第1実施形態の両方において、p側電極のシート抵抗は、 $1.6\Omega/\text{cm}^2$ と低い値を示した。しかし、100nmの膜厚を有するPdを用いて形成されたp側電極は、ほぼ不透明であった。このため、p側電極が良好な透明性を有するためには、上記表1に示したように、p側電極を10nm以下の厚みで形成することが好ましい。

【0042】第1実施形態では、上記のように、Ga_{0.95}Nよりもバンドギャップの小さいGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9を設けることによって、p型コンタクト層9のキャリア濃度を、Ga_{0.95}Nからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層9とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層9と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0043】また、第1実施形態では、上記のように、Ga_{0.95}Nよりもバンドギャップの小さいGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9を設けることによって、p型コンタクト層9の電気伝導度を、Ga_{0.95}Nからなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層9内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0044】また、第1実施形態では、上記のように、p型クラッド層7とp型コンタクト層9との間に形成されたGa_{0.95}Nからなるp型中間層8が、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9のバンドギャップとAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているため、p型中間層8により、p型コンタクト層9とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層9からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0045】次に、図1および図2を参照して、第1実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）の製造方法について説明する。まず、MOVPE法（M

etal Organic Vapor Phase Epitaxy：有機金属化学的気相成長法）を用いて、サファイア基板1を非単結晶成長温度、たとえば、約600℃に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約50％）と、NH₃、トリメチルアルミニウム（TMA1）およびトリメチルガリウム（TMGa）からなる原料ガスとを用いて、サファイア基板1上に、非単結晶のAlGa_{0.95}Nからなる低温バッファ層2を形成する。

【0046】この後、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約50％）と、NH₃およびTMGaからなる原料ガスとを用いて、約1μm/hの成長速度で、低温バッファ層2上に、単結晶のアンドープGa_{0.95}Nからなる高温バッファ層3を成長させる。

【0047】続いて、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約50％）と、NH₃およびTMGaからなる原料ガスと、SiH₄からなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、高温バッファ層3上に、単結晶のSiドーパドGa_{0.95}Nからなるn型コンタクト層4を成長させる。

【0048】次に、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1％～約5％）と、NH₃、トリエチルガリウム（TEGa）およびトリメチルインジウム（TMIn）からなる原料ガスとを用いて、約0.4nm/sの成長速度で、n型コンタクト層4上に、単結晶のアンドープGa_{0.95}In_{0.35}Nからなる井戸層5b（5層）とを交互に成長させることにより、MQW発光層5を形成する。続いて、MQW発光層5上に、約0.4nm/sの成長速度で、単結晶のアンドープGa_{0.95}Nからなる保護層6を成長させる。

【0049】この後、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1％～約3％）と、NH₃、TMGaおよびTMA1からなる原料ガスと、シクロペンタジエニルマグネシウム（Cp₂Mg）からなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、保護層6上に、単結晶のMgドーパドAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7を形成する。そのp型クラッド層7上に、原料ガスをNH₃およびTMGaからなる原料ガスに変えた後、約3μm/hの成長速度で、単結晶のMgドーパドGa_{0.95}Nからなるp型中間層8を形成する。

【0050】次に、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1％～約5％）と、NH₃、TEGaおよびTMInからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、

p型中間層8上に、MgドープGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層9を形成する。ここで、第1実施形態では、p型コンタクト層9の形成時に、成長温度を約1150℃から約850℃に降温する際に、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7上に、Al組成を含まないGaNからなるp型中間層8が形成されているので、p型クラッド層7の表面が変質するのを防止することができる。これにより、p型コンタクト層9からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。また、p型クラッド層7の変質に起因する面内の抵抗のばらつきを低減することができるので、発光むらを低減することができる。これにより、均一な発光を得ることができる。

【0051】この後、反応性イオンビームエッチング(RIBE)法などを用いて、p型コンタクト層9、p型中間層8、p型クラッド層7、保護層6、MQW発光層5およびn型コンタクト層4の一部領域をエッチングにより除去する。

【0052】そして、図1および図2に示すように、真空蒸着法などを用いて、p型コンタクト層9の上面上のほぼ全面にPd膜10aおよびAu膜10bからなるp側電極10を形成する。そのp側電極10上に、Ti膜11aおよびAu膜11bからなるp側パッド電極11を形成する。また、エッチングにより露出されたn型コンタクト層4の表面に、Alからなるn側電極12を形成する。その後、チップを約600℃の温度で熱処理することによって、p側電極10およびn側電極12を、それぞれp型コンタクト層9およびn型コンタクト層4にオーミック接触させる。

【0053】最後に、スクライブ、ダイシングおよびブレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約400μmのほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行う。このようにして、図1および図2に示されるような第1実施形態の発光ダイオード素子(青色LEDチップ)が形成される。

【0054】さらに、上記のようにして形成された第1実施形態の青色LEDチップをフレームに固定した後、樹脂モールドを200℃前後の温度で硬化させることによって、第1実施形態の青色LEDチップをLEDランプとして用いてもよい。

【0055】第1実施形態では、上記のように、p型クラッド層7からp型コンタクト層9を結晶成長する際に、キャリアガスの水素組成を低くすることによって、Mgドープパントを活性化させる。それによって、高キャリア濃度のp型半導体各層(7~9)を得ることができる。

【0056】(第2実施形態)図3は、本発明の第2実施形態による発光ダイオード素子(紫外LEDチップ)を示した断面図である。この第2実施形態では、第1実施形態のn型コンタクト層4下に、高温バッファ層3に

比べてより低転位のアンドープGaN層24を形成した例を示している。

【0057】まず、図3を参照して、第2実施形態による発光ダイオード素子の構造について詳細に説明する。図3に示すように、サファイア基板21上に、約10nm~約1000nmの膜厚を有するSiNからなる逆メサ形状(逆台形状)のマスク層22が、約7μmの周期のストライプ状(細長状)に形成されている。また、マスク層22は、隣接するマスク層22間の最短距離が、マスク層22間に露出したサファイア基板21の幅より小さくなるように形成されている。なお、サファイア基板21は、本発明の「基板」の一例である。

【0058】そのマスク層22間に露出したサファイア基板21上には、約10nm~約50nmの膜厚を有するAlGaNまたはGaNからなる低温バッファ層23が形成されている。そして、低温バッファ層23上およびマスク層22上には、マスク層22を埋め込むように、約2μmの膜厚を有するとともに、第1実施形態の高温バッファ層3に比べて低転位のアンドープGaN層24が形成されている。

【0059】そして、アンドープGaN層24上には、n型コンタクト層4が凸部を有するように形成されている。そのn型コンタクト層4の凸部の上面上のほぼ全面と接触するように、多重量子井戸(MQW)発光層15が形成されている。

【0060】ここで、この第2実施形態では、MQW発光層15は、6つのアンドープGaNからなる障壁層15aと、5つのアンドープGa_{0.1}In_{0.9}Nからなる井戸層15bとが交互に積層された構造を有する。このような組成を有するMQW発光層15によって紫外光を発光させることができる。なお、MQW発光層15は、本発明の「発光層」の一例である。

【0061】MQW発光層15上には、保護層6、p型クラッド層7およびp型中間層8が形成されている。p型中間層8上には、約0.3μmの膜厚を有するとともに、約5×10¹⁹cm⁻³のドーピング量および約7×10¹⁸cm⁻³のキャリア濃度を有するMgドープGa_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19が形成されている。なお、p型コンタクト層19は、本発明の「コンタクト層」の一例である。また、各層4および6~8の組成は、第1実施形態と同様である。

【0062】また、この第2実施形態では、GaNからなるp型中間層8は、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7のバンドギャップと、Ga_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有する。

【0063】そのp型コンタクト層19の上面上には、第1実施形態と同様、約2nmの膜厚を有するPd膜10aと約4nmの膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10、および、約30nmの膜厚を有す

るTi膜11aと約500nmの膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、一部領域が除去されて露出されたn型コンタクト層4の表面には、約500nmの膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0064】上記した第2実施形態の発光ダイオード素子において、p側パッド電極11とn側電極12との間に順方向電圧を印加したところ、約390nmの波長を有する紫外領域の発光が得られた。また、第2実施形態のGa_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19上にp側電極10を形成した場合、GaNからなるp型コンタクト層上にp側電極を形成した場合に比べて、発光強度が約2倍に向上することがわかった。

【0065】第2実施形態では、上記のように、第1実施形態の高温バッファ層3に比べて低転位のアンドープGaN層24上に、各層4、6～8、15および19と、各電極10～12とを形成することによって、発光効率の高い紫外LEDチップを形成することができる。

【0066】また、第2実施形態では、第1実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さいGa_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19を設けることによって、p型コンタクト層19のキャリア濃度を、GaNからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層19とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層19と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0067】また、第2実施形態では、上記のように、GaNよりもバンドギャップの小さいGa_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19を設けることによって、p型コンタクト層19の電気伝導度を、GaNからなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層19内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0068】また、第2実施形態では、上記のように、p型クラッド層7とp型コンタクト層19との間に形成されたGaNからなるp型中間層8が、Ga_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層19のバンドギャップとAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているのので、p型中間層8により、p型コンタクト層19とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層19からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0069】図4～図6は、本発明の第2実施形態によ

る発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の形成方法を説明するための断面図である。次に、図3～図6を参照して、第2実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の製造方法について説明する。

【0070】まず、サファイア基板21の上面上の全面にSiN膜（図示せず）を形成した後、SiN膜の所定領域上にレジスト（図示せず）を形成する。そして、そのレジストをマスクとして、SiN膜をウェットエッチングすることによって、図4に示されるようなストライプ状のマスク層22を形成する。このマスク層22は、マスク層22の斜めに形成された側面とサファイア基板21との間にオーバーハング部を有するように、逆メサ形状（逆台形状）に形成されている。また、マスク層22間の開口部は、たとえば、サファイア基板21の[11-20]方向またはサファイア基板21の[1-100]方向に形成するのが好ましい。

【0071】この後、図4に示すように、マスク層22間に露出したサファイア基板21上に、約500℃～約700℃の成長温度で、AlGaNまたはGaNからなる低温バッファ層23を成長させる。

【0072】次に、図5に示すように、MOVPE法またはHVPE法（Hydride Vapor Phase Epitaxy；ハライド気相成長法）などを用いて、マスク層22を選択成長マスクとして、低温バッファ層23上に、約950℃～約1200℃の成長温度で、アンドープGaN層24を選択横方向成長させる。この場合、露出された低温バッファ層23の上面上において、アンドープGaN層24は、まず、上方向に成長する。これにより、低温バッファ層23の上面上の中央部付近に、断面が三角形のファセット構造のアンドープGaN層24aが成長されるとともに、低温バッファ層23の上面上のオーバーハング部下の部分に小さなファセット構造のアンドープGaN層24bが形成される。

【0073】さらに、アンドープGaN層24a（24b）からなるファセットの成長が進むと、各アンドープGaN層24a（24b）は横方向に成長して合体するとともに、マスク層22上にも成長される。それによって、図6に示されるような、上面が平坦な連続膜からなるアンドープGaN層24が形成される。

【0074】第2実施形態では、サファイア基板21上に、低温バッファ層23を介してアンドープGaN層24を形成することによって、アンドープGaN層24の結晶成長が促進されるので、低温バッファ層23の上面上のオーバーハング部下の部分にアンドープGaN層24からなる小さなファセットを多く形成することができる。このように低温バッファ層23の上面上に、アンドープGaN層24からなる多くのファセットを形成することによって、アンドープGaN層24の成長は、成長初期から横方向成長が支配的になる。これにより、より

多くの転位が横方向に曲げられるので、より薄い厚みで、転位密度が約 $7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ に低減されたアンドープ GaN 層 24 を形成することができる。

【0075】次に、図1に示した第1実施形態の各層4～9を形成する際のプロセスと同様のプロセスを用いて、アンドープ GaN 層 24 上に、n 型コンタクト層 4、MQW 発光層 15、保護層 6、p 型クラッド層 7、p 型中間層 8、および、約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有する Mg ドープ $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなる p 型コンタクト層 19 を形成した後、p 型コンタクト層 19、p 型中間層 8、p 型クラッド層 7、保護層 6、MQW 発光層 15 および n 型コンタクト層 4 の一部領域をエッチングにより除去する。その p 型コンタクト層 19 上に、第1実施形態の各電極 10～12 を形成する際のプロセスと同様のプロセスを用いて、p 側電極 10、p 側パッド電極 11 を形成するとともに、エッチングにより露出された n 型コンタクト層 4 の表面に、n 側電極 12 を形成する。

【0076】なお、この第2実施形態のプロセスにおいても、p 型コンタクト層 19 の形成時に、成長温度を約 1150°C から約 850°C に降温する際に、Al_{0.05}Ga_{0.95}N からなる p 型クラッド層 7 上に、Al 組成を含まない GaN からなる p 型中間層 8 が形成されているので、p 型クラッド層 7 の表面が変質するのを防止することができる。これにより、p 型コンタクト層 19 から p 型クラッド層 7 へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。また、p 型クラッド層 7 の変質に起因する面内の抵抗のばらつきを低減することができるので、発光むらを低減することができる。これにより、均一な発光を得ることができる。

【0077】最後に、第1実施形態と同様、スクライプ、ダイシングおよびブレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約 $400 \mu\text{m}$ のほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行うことにより、図3に示されるような第2実施形態の発光ダイオード素子（紫外 LED チップ）が形成される。

【0078】（第3実施形態）図7は、本発明の第3実施形態による発光ダイオード素子を示した上面図である。この第3実施形態では、第1実施形態の p 側電極 10 の代わりに、網目状の p 側電極 31 を形成した例を示している。以下、詳細に説明する。

【0079】この第3実施形態では、図7に示すように、真空蒸着法を用いて、p 型コンタクト層 9 上に、p 型コンタクト層 9 の上面の約 10% を覆うように、約 100 nm の膜厚を有する Pd 膜と、その Pd 膜上に形成された約 100 nm の膜厚を有する Au 膜とからなる p 側電極 31 が形成されている。この p 側電極 31 は、電極間に、電極が形成されていない光を透過可能な間隙を有するように、網目状に形成されている。すなわち、この p 側電極 31 を構成する Pd 膜および Au 膜は、約 2

$0 \mu\text{m}$ の電極幅と、約 $50 \mu\text{m}$ の電極間距離を有するように形成されている。その p 側電極 31 の上面の一部には、約 30 nm の膜厚を有する Ti 膜と、約 500 nm の膜厚を有する Au 膜とから構成される p 側パッド電極 32 が形成されている。なお、p 側電極 31 は、本発明の「透光性を有する電極」の一例である。また、第3実施形態の p 側電極 31 および p 側パッド電極 32 以外の部分の構造は、図1に示した第1実施形態の発光ダイオード素子の構造と同様である。

【0080】この場合、p 型コンタクト層 9 を高キャリア濃度の $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ を用いて形成することによって、p 型コンタクト層 9 における電流の拡散を大きくすることができるので、p 側電極 31 の電極間距離を十分に小さくすることによって、p 型コンタクト層 9 のほぼ全面に電流を流すことができる。

【0081】第3実施形態では、上記のように、p 型コンタクト層 9 上に、電極の形成されていない間隙を有するように、網目状の p 側電極 31 を形成することによって、その間隙における光の透過率を向上させることができる。それによって、p 側電極 31 全体での光の透過率を向上させることができる。

【0082】また、第3実施形態では、上記のように、p 型コンタクト層 9 上に、電極の形成されていない間隙を有するように、網目状の p 側電極 31 を形成することによって、p 側電極 31 の間隙以外の部分を大きな厚み（約 200 nm ）で形成することができる。それによって、p 側電極 31 のシート抵抗をより低減することができる。

【0083】また、第3実施形態では、第1実施形態と同様、GaN よりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなる p 型コンタクト層 9 を設けることによって、p 型コンタクト層 9 のキャリア濃度を、GaN からなる p 型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p 型コンタクト層 9 と p 側電極 31 との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p 型コンタクト層 9 と透光性を有する p 側電極 31 とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0084】また、第3実施形態では、第1実施形態と同様、GaN よりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなる p 型コンタクト層 9 を設けることによって、p 型コンタクト層 9 の電気伝導度を、GaN からなる p 型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p 型コンタクト層 9 内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0085】また、第3実施形態では、第1実施形態と同様、p 型クラッド層 7 と p 型コンタクト層 9 との間に形成された GaN からなる p 型中間層 8 が、 $\text{Ga}_{0.85}\text{In}$

$\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層9のバンドギャップと $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているの
で、p型中間層8により、p型コンタクト層9とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層9からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0086】（第4実施形態）図8は、本発明の第4実施形態による発光ダイオード素子を示した上面図である。この第4実施形態では、第1実施形態のp側電極10の代わりに、くし状のp側電極41を形成した例を示している。以下、詳細に説明する。

【0087】この第4実施形態では、図8に示すように、p型コンタクト層9上に、約100nmの膜厚を有するPd膜と、Pd膜上に形成された約100nmの膜厚を有するAu膜とからなる、くし状のp側電極41が形成されている。そのp側電極41の上面の一部には、約30nmの膜厚を有するTi膜と、約500nmの膜厚を有するAu膜とから構成されるp側パッド電極42が形成されている。なお、p側電極41は、本発明の「透光性を有する電極」の一例である。また、第4実施形態のp側電極41およびp側パッド電極42以外の部分の構造は、図1に示した第1実施形態の発光ダイオード素子の構造と同様である。

【0088】第4実施形態では、上記のように、p型コンタクト層9上に、電極の形成されていない領域を有するように、くし状のp側電極41を形成することによって、そのp側電極41の形成されていない領域における光の透過率を向上させることができる。それによって、p側電極41全体での光の透過率を向上させることができる。

【0089】また、第4実施形態では、上記のように、p型コンタクト層9上に、電極の形成されていない領域を有するように、くし状のp側電極41を形成することによって、p側電極41を大きな厚み（約200nm）で形成することができる。それによって、p側電極41のシート抵抗をより低減することができる。

【0090】また、第4実施形態では、第1実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層9を設けることによって、p型コンタクト層9のキャリア濃度を、GaNからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層9とp側電極41との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層9と透光性を有するp側電極41とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0091】また、第4実施形態では、第1実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層9を設けることによって、p型コンタクト層9の電気伝導度を、GaNからなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層9内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0092】また、第4実施形態では、第1実施形態と同様、p型クラッド層7とp型コンタクト層9との間に形成されたGaNからなるp型中間層8が、 $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層9のバンドギャップと $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているの
で、p型中間層8により、p型コンタクト層9とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層9からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0093】（第5実施形態）図9は、本発明の第5実施形態による発光ダイオード素子を示した上面図である。この第5実施形態では、第1実施形態のp側電極10の代わりに、ミアンダ（meander）状のp側電極51を形成した例を示している。以下、詳細に説明する。

【0094】この第5実施形態では、図9に示すように、p型コンタクト層9上に、約100nmの膜厚を有するPd膜と、Pd膜上に形成された約100nmの膜厚を有するAu膜とからなるp側電極51が、p型コンタクト層9上を蛇行するようなミアンダ状に形成されている。そのp側電極51の上面の一部には、約30nmの膜厚を有するTi膜と、約500nmの膜厚を有するAu膜とから構成されるp側パッド電極52が形成されている。なお、p側電極51は、本発明の「透光性を有する電極」の一例である。また、第5実施形態のp側電極51およびp側パッド電極52以外の部分の構造は、図1に示した第1実施形態の発光ダイオード素子の構造と同様である。

【0095】第5実施形態では、上記のように、p型コンタクト層9上に、電極の形成されていない領域を有するように、ミアンダ状のp側電極51を形成することによって、そのp側電極51の形成されていない領域における光の透過率を向上させることができる。それによって、p側電極51全体での光の透過率を向上させることができる。

【0096】また、第5実施形態では、上記のように、p型コンタクト層9上に、電極の形成されていない領域を有するように、ミアンダ状のp側電極51を形成することによって、p側電極51を大きな厚み（約200nm）で形成することができる。それによって、p側電極51のシート抵抗をより低減することができる。

m) で形成することができる。それによって、p 側電極 51 のシート抵抗をより低減することができる。

【0097】また、第5実施形態では、第1実施形態と同様、Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型コンタクト層 9 を設けることによって、p 型コンタクト層 9 のキャリア濃度を、Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p 型コンタクト層 9 と p 側電極 51 との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p 型コンタクト層 9 と透光性を有する p 側電極 51 とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0098】また、第5実施形態では、第1実施形態と同様、Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型コンタクト層 9 を設けることによって、p 型コンタクト層 9 の電気伝導度を、Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p 型コンタクト層 9 内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0099】また、第5実施形態では、第1実施形態と同様、p 型クラッド層 7 と p 型コンタクト層 9 との間に形成された Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型中間層 8 が、Ga_{0.85}In_{0.15}N からなる p 型コンタクト層 9 のバンドギャップと Al_{0.05}Ga_{0.95}N からなる p 型クラッド層 7 のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているのので、p 型中間層 8 により、p 型コンタクト層 9 と p 型クラッド層 7 とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p 型コンタクト層 9 から p 型クラッド層 7 へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0100】(第6実施形態) 図10は、本発明の第6実施形態による発光ダイオード素子(紫外LEDチップ)を示した断面図である。また、図11は、図10に示した発光ダイオード素子(紫外LEDチップ)の上面図である。図10および図11を参照して、この第6実施形態では、上記した第2実施形態において、保護層、p 型中間層および p 型コンタクト層の組成を変更した例について説明する。以下、詳細に説明する。

【0101】まず、図10および図11を参照して、第6実施形態による発光ダイオード素子の構造について詳細に説明する。この第6実施形態では、図10に示すように、サファイア基板 21 の(0001)面上に、約10nm~約1000nmの膜厚を有する SiN からなる逆メサ形状(逆台形状)のマスク層 22 が、約7μmの周期のストライプ状(細長状)に形成されている。また、マスク層 22 は、隣接するマスク層 22 間の最短距離が、マスク層 22 間に露出したサファイア基板 21 の

幅よりも小さくなるように形成されている。

【0102】そのマスク層 22 間に露出したサファイア基板 21 上には、約10nm~約50nmの膜厚を有する AlGa_{0.95}N または Ga_{0.95}N からなる低温バッファ層 23 が形成されている。そして、低温バッファ層 23 上およびマスク層 22 上には、マスク層 22 を埋め込むように、約2μmの膜厚を有するとともに、第1実施形態の高温バッファ層 3 に比べて低転位のアンドープ Ga_{0.95}N 層 24 が形成されている。

【0103】そして、アンドープ Ga_{0.95}N 層 24 上には、約5μmの膜厚の凸部を有する Ge ドープ Ga_{0.95}N からなる n 型コンタクト層 4 が形成されている。この n 型コンタクト層 4 は、n 型クラッド層を兼用するように形成されている。

【0104】また、n 型コンタクト層 4 の凸部の上面上のほぼ全面と接触するように、MQW 発光層 15 が形成されている。この MQW 発光層 15 は、約5nmの膜厚を有する 6 つのアンドープ Ga_{0.95}N からなる障壁層 15a と、約5nmの膜厚を有する 5 つのアンドープ Ga_{0.95}In_{0.05}N からなる井戸層 15b とが交互に積層された構造を有する。このような組成を有する MQW 発光層 15 によって紫外光を発光させることができる。

【0105】ここで、第6実施形態では、MQW 発光層 15 上には、MQW 発光層 15 の結晶の劣化を防止するために、約10nmの膜厚を有する Mg ドープ Al_{0.02}Ga_{0.98}N からなる保護層 66 が形成されている。保護層 66 上には、約0.15μmの膜厚を有するとともに、約 $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有する Mg ドープ Al_{0.05}Ga_{0.95}N からなる p 型クラッド層 67 と、約70nmの膜厚を有するとともに、約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するアンドープ Al_{0.01}Ga_{0.99}N からなる p 型中間層 68 とがこの順序で形成されている。なお、p 型クラッド層 67 は、本発明の「第2窒化物系半導体層」および「クラッド層」の一例であり、p 型中間層 68 は、本発明の「中間層」の一例である。そして、その p 型中間層 68 上には、約3nmの膜厚を有するとともに、約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するアンドープ Ga_{0.92}In_{0.08}N からなる p 型コンタクト層 69 が形成されている。なお、p 型コンタクト層 69 は、本発明の「コンタクト層」の一例である。

【0106】第6実施形態の p 型中間層 68 および p 型コンタクト層 69 は、上記のように、アンドープである。この場合、変調ドーピング(modulation doping)の効果により、p 型クラッド層 67 から p 型中間層 68 および p 型コンタクト層 69 にホール(正孔)が供給されるので、p 型中間層 68 および p 型コンタクト層 69 は、p 型の伝導性を示す。

【0107】また、この第6実施形態では、Al_{0.01}Ga_{0.99}N からなる p 型中間層 68 は、Al_{0.05}Ga_{0.95}N

Nからなるp型クラッド層67のバンドギャップと、 $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなるp型コンタクト層69のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有する。

【0108】p型コンタクト層69の上面上には、約2nmの膜厚を有するPd膜10aと、約4nmの膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10が形成されている。p側電極10は、透光性を有するように薄い厚み（合計膜厚約6nm）で形成されている。

【0109】また、図10および図11に示すように、p側電極10の上面上の一部には、約30nmの膜厚を有するTi膜11aと、約500nmの膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、p型コンタクト層69からn型コンタクト層4までの一部領域が除去されている。そのn型コンタクト層4の露出した表面には、約500nmの膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0110】第6実施形態では、p型クラッド層67とp型コンタクト層69との間に形成された $\text{Al}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ からなるp型中間層68が、 $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなるp型コンタクト層69のバンドギャップと $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層67のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているので、p型中間層68により、p型コンタクト層69とp型クラッド層67とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層69からp型クラッド層67へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0111】また、第6実施形態では、第2実施形態と同様、第1実施形態の高温バッファ層3に比べて低転位のアンドープGaN層24上に、各層4、15、66、67、68および69と、各電極10～12とを形成することによって、発光効率の高い紫外LEDチップを形成することができる。

【0112】また、第6実施形態では、第2実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなるp型コンタクト層69を設けることによって、p型コンタクト層69のキャリア濃度を、GaNからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層69とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層69と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0113】また、第6実施形態では、第2実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さい $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなるp型コンタクト層69を設けることによって、p型コンタクト層69の電気伝導度を、GaN

からなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層69内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0114】次に、図10および図11を参照して、第6実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の製造方法について説明する。

【0115】まず、第2実施形態と同様の製造プロセスを用いて、サファイア基板21上に、各層22～24および4を形成する。

【0116】次に、第2実施形態と同様、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、 H_2 および N_2 からなるキャリアガス（ H_2 ：約1%～約5%）と、 NH_3 、TEGaおよびTMInからなる原料ガスとを用いて、約0.4nm/sの成長速度で、n型コンタクト層4上に、単結晶のアンドープGaNからなる障壁層15a（6層）と、単結晶のアンドープ $\text{Ga}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{N}$ からなる井戸層15b（5層）とを交互に成長させることにより、MQW発光層15を形成する。その後、 H_2 および N_2 からなるキャリアガス（ H_2 ：約1%～約3%）と、 NH_3 、TMGaおよびTMAIからなる原料ガスと、 Cp_2Mg からなるドーパントガスとを用いて、MQW発光層15上に、約0.4nm/sの成長速度で、単結晶のMgドーパ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ からなる保護層66を成長させる。

【0117】この後、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、 H_2 および N_2 からなるキャリアガス（ H_2 ：約1%～約3%）と、 NH_3 、TMGaおよびTMAIからなる原料ガスと、 Cp_2Mg からなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、保護層66上に、単結晶のMgドーパ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層67を形成する。そのp型クラッド層67上に、約3μm/hの成長速度で、単結晶のアンドープ $\text{Al}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ からなるp型中間層68を形成する。

【0118】次に、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、 H_2 および N_2 からなるキャリアガス（ H_2 ：約1%～約5%）と、 NH_3 、TEGaおよびTMInからなる原料ガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、p型中間層68上に、アンドープ $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{N}$ からなるp型コンタクト層69を形成する。ここで、第6実施形態では、p型コンタクト層69の形成時に、成長温度を約1150℃から約850℃に降温する際に、 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層67上に、p型クラッド層67よりもAl組成が少ない $\text{Al}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ からなるp型中間層68が形成されているので、p型クラッド層67の表面が変質するのを防止することができる。これにより、p型コンタクト層69からp型クラッド層67へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。また、p型クラッド

層67の変質に起因する面内の抵抗のばらつきを低減することができるので、発光むらを低減することができる。これにより、均一な発光を得ることができる。

【0119】この後、RIBE法などを用いて、p型コンタクト層69、p型中間層68、p型クラッド層67、保護層66、MQW発光層15およびn型コンタクト層4の一部領域をエッチングにより除去する。

【0120】そして、図10および図11に示すように、真空蒸着法などを用いて、p型コンタクト層69の上面上のほぼ全面にPd膜10aおよびAu膜10bからなるp側電極10を形成する。そのp側電極10上に、Ti膜11aおよびAu膜11bからなるp側パッド電極11を形成する。また、エッチングにより露出されたn型コンタクト層4の表面に、Alからなるn側電極12を形成する。その後、チップを約600℃の温度で熱処理することによって、p側電極10およびn側電極12を、それぞれp型コンタクト層69およびn型コンタクト層4にオーミック接触させる。

【0121】最後に、スクライブ、ダイシングおよびブレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約400μmのほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行う。このようにして、図10および図11に示されるような第6実施形態の発光ダイオード素子(紫外LEDチップ)が形成される。

【0122】さらに、上記のようにして形成された第6実施形態の紫外LEDチップをフレームに固定した後、樹脂モールドを200℃前後の温度で硬化させることによって、第6実施形態の紫外LEDチップをLEDランプとして用いてもよい。

【0123】第6実施形態では、上記のように、保護層66からp型コンタクト層69を結晶成長する際に、キャリアガスの水素組成を低くすることによって、Mgドープパントを活性化させる。それによって、高キャリア濃度のp型半導体各層(66、67、68および69)を得ることができる。

【0124】(第7実施形態)図12は、本発明の第7実施形態による発光ダイオード素子(紫外LEDチップ)を示した断面図である。この第7実施形態では、上記第1～第6実施形態と異なり、p型中間層のAl組成を連続的に変化させた場合の例について説明する。

【0125】まず、図12を参照して、第7実施形態による発光ダイオード素子の構造について詳細に説明する。第7実施形態では、図12に示すように、第6実施形態と同様、サファイア基板21上に、逆メサ形状(逆台形状)のマスク層22と、低温バッファ層23とが形成されている。低温バッファ層23およびマスク層22上には、マスク層22を埋め込むように、第1実施形態の高温バッファ層3に比べて低転位のアンドープGaN層24が形成されている。なお、各層22～24の組成および膜厚は第6実施形態と同様である。

【0126】そして、アンドープGaN層24の上面上に、凸部を有するn型コンタクト層4が形成されている。このn型コンタクト層4の凸部の上面上のほぼ全面と接触するように、MQW発光層15と、約10nmの膜厚を有するアンドープGaNからなる保護層6と、約 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するp型クラッド層77とがこの順序で形成されている。このp型クラッド層77は、本発明の「第2窒化物系半導体層」および「クラッド層」の一例である。ここで、MQW発光層15は、約5nmの膜厚を有する6つのアンドープGaNからなる障壁層15aと、約5nmの膜厚を有する5つのアンドープGa_{0.1}In_{0.9}Nからなる井戸層15bとが交互に積層された構造を有する。なお、n型コンタクト層4の組成および膜厚は第6実施形態と同様である。

【0127】ここで、第7実施形態では、p型クラッド層77上に、Al組成が連続的に変化するとともに、約0.3μmの膜厚を有するMgドープAl_xGa_{1-x}N(0.05 ≤ x ≤ 0)からなるp型中間層78が形成されている。このp型中間層78は、約 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ～約 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有する。このp型中間層78上には、約3nmの膜厚を有するとともに、約 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープGa_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層79が形成されている。なお、p型中間層78の組成は、p型クラッド層77からp型コンタクト層79に向かって、X=0.05からX=0に連続的に変化されている。また、このp型中間層78は、実質的に、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層77のバンドギャップと、Ga_{0.92}In_{0.08}Nからなるp型コンタクト層79のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有する。このp型中間層78は、本発明の「中間層」の一例であり、p型コンタクト層79は、本発明の「コンタクト層」の一例である。

【0128】p型コンタクト層79の上面上には、第6実施形態と同様、約2nmの膜厚を有するPd膜10aと約4nmの膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10、および、約30nmの膜厚を有するTi膜11aと約500nmの膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、一部領域が除去されたn型コンタクト層4の表面には、約500nmの膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0129】第7実施形態では、第2実施形態および第6実施形態と同様、第1実施形態の高温バッファ層3に比べて低転位のアンドープGaN層24上に、各層4、15、6、77、78および79と、各電極10～12とを形成することによって、発光効率の高い紫外LEDチップを形成することができる。

【0130】また、第7実施形態では、第2実施形態および第6実施形態と同様、Ga_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層79を設けることによって、p型コンタクト層79のキャリア濃度を、Ga_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層79とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層79と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0131】また、第7実施形態では、第2実施形態および第6実施形態と同様、Ga_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層79を設けることによって、p型コンタクト層79の電気伝導度を、Ga_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層79内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0132】また、第7実施形態では、上記のように、A1組成を0.05から0まで連続的に変化させたp型中間層78が、Ga_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層79のバンドギャップと、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層77のバンドギャップとの中間のバンドギャップを実質的に有するので、p型中間層78により、p型コンタクト層79とp型クラッド層77とのバンドギャップの不連続をより緩和することができる。これにより、p型コンタクト層79からp型クラッド層77へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0133】次に、図12を参照して、第7実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の製造方法について説明する。

【0134】まず、上記した第6実施形態と同様の製造プロセスを用いて、図12に示すように、サファイア基板21上に、マスク層22と、低温バッファ層23とを順次形成する。そして、MOVPE法またはHVPE法などを用いて、マスク層22を選択成長マスクとして、低温バッファ層23およびマスク層22上に、アンドープGa_{0.92}N層24を選択横方向成長させる。その後、アンドープGa_{0.92}N層24上に、n型コンタクト層4と、MQW発光層15と、アンドープGa_{0.92}Nからなる保護層6とを順次形成する。なお、各層22～24、4および15の組成および膜厚は第6実施形態と同様である。

【0135】次に、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1%～約3%）と、NH₃、TMGaおよびTMAIからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなる

ドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、保護層6上に、単結晶のMgドーパAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層77を形成する。

【0136】この後、第7実施形態では、基板温度を約1150℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1%～約3%）と、NH₃、TMGaおよびTMAIからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、p型クラッド層77上に、A1組成を連続的に変化させた単結晶のMgドーパAl_{1-X}Ga_XN（0.05≤X≤0）からなるp型中間層78を形成する。このp型中間層78のA1組成は、p型クラッド層77からp型コンタクト層79へ向かって、X=0.05からX=0へと連続的に変化させている。

【0137】次に、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、第6実施形態と同様の製造プロセスを用いて、p型中間層78上に、MgドーパGa_{0.92}N_{0.08}からなるp型コンタクト層79を形成する。ここで、第7実施形態では、p型コンタクト層79の形成時に、成長温度を約1150℃から約850℃に降温する際に、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層77上に、A1組成を連続的に変化させているAl_XGa_{1-X}Nからなるp型中間層78（上面のA1組成が0）が形成されているので、p型クラッド層77の表面が変質するのを防止することができる。これにより、p型コンタクト層79からp型クラッド層77へ流れる電流に対する抵抗をより低減することができる。また、p型クラッド層77の変質に起因する面内の抵抗のばらつきを低減することができるので、発光むらを低減することができる。これにより、均一な発光を得ることができる。

【0138】この後、RIE法などを用いて、p型コンタクト層79、p型中間層78、p型クラッド層77、保護層6、MQW発光層15およびn型コンタクト層4の一部領域をエッチングにより除去する。

【0139】そして、第6実施形態の各電極10～12を形成する際のプロセスと同様のプロセスを用いて、p型コンタクト層79上に、p側電極10、p側パッド電極11を形成するとともに、エッチングにより露出されたn型コンタクト層4の表面に、n側電極12を形成する。

【0140】最後に、第6実施形態と同様、スクライプ、ダイシングおよびブレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約400μmのほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行うことにより、図12に示されるような第7実施形態の発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）が形成される。

【0141】（第8実施形態）図13は、本発明の第8実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）を示した断面図である。図13を参照して、この第

10

20

30

40

50

8実施形態では、図1に示した第1実施形態の構造において、p型中間層の組成を変更した例について説明する。

【0142】すなわち、この第8実施形態による発光ダイオード素子では、図13に示すように、サファイア基板1の(0001)面上に、第1実施形態と同様の組成および膜厚を有する各層2~7が形成されている。そして、MgドープAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7上に、約70nmの膜厚を有するとともに、約 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープGa_{0.95}In_{0.05}Nからなるp型中間層88が形成されている。なお、p型中間層88は、本発明の「中間層」の一例である。p型中間層88上には、約0.3μmの膜厚を有するとともに、約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有する第1実施形態と同様のMgドープGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層89が形成されている。

【0143】p型コンタクト層89の上面上には、第1実施形態と同様、約2nmの膜厚を有するPd膜10aと約4nmの膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10、および、約30nmの膜厚を有するTi膜11aと約500nmの膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、一部領域が除去されて露出されたn型コンタクト層4の表面には、約500nmの膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0144】第8実施形態では、上記したように、p型クラッド層7とp型コンタクト層89との間に形成されたGa_{0.95}In_{0.05}Nからなるp型中間層88が、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層89のバンドギャップとAl_{0.05}Ga_{0.95}Nからなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているので、p型中間層88により、p型コンタクト層89とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層89からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0145】また、第8実施形態では、第1実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さいGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層89を設けることによって、p型コンタクト層89のキャリア濃度を、GaNからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層89とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層89と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくすることができる。その結果、均一な発光を得ることができるとともに、駆動電圧を低くすることができる。

【0146】また、第8実施形態では、第1実施形態と同様、GaNよりもバンドギャップの小さいGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層89を設けることによって、p型コンタクト層89の電気伝導度を、GaNからなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層89内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0147】次に、図13を参照して、第8実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）の製造方法について説明する。まず、図1に示した第1実施形態と同様の製造プロセスを用いて、サファイア基板1上に、各層2~7を形成する。

【0148】次に、第8実施形態では、基板温度を約850℃の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂:約1%~約5%）と、NH₃、TEGaおよびTMInからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなるドーパントガスとを用いて、約3μm/hの成長速度で、p型クラッド層7上に、Ga_{0.95}In_{0.05}Nからなるp型中間層88を形成する。続いて、p型中間層88上に、約3μm/hの成長速度で、MgドープGa_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層89を形成する。

【0149】この後、RIBE法などを用いて、p型コンタクト層89、p型中間層88、p型クラッド層7、保護層6、MQW発光層5およびn型コンタクト層4の一部領域をエッチングにより除去する。

【0150】そして、第1実施形態の各電極10~12を形成する際のプロセスと同様のプロセスを用いて、p型コンタクト層89上に、p側電極10、p側パッド電極11を形成するとともに、エッチングにより露出されたn型コンタクト層4の表面に、n側電極12を形成する。

【0151】最後に、第1実施形態と同様、スクライブ、ダイシングおよびブレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約400μmのほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行うことにより、図13に示されるような第8実施形態の発光ダイオード素子（青色LEDチップ）が形成される。

【0152】（第9実施形態）図14は、本発明の第9実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）を示した断面図である。この第9実施形態は、上記第1実施形態の構造において、保護層を形成しないとともに、p型中間層の組成を変更した場合の例について説明する。

【0153】すなわち、この第9実施形態による発光ダイオード素子では、図14に示すように、サファイア基板1上に、第1実施形態と同様の組成および膜厚を有する各層2~5が形成されている。

【0154】ここで、第9実施形態では、MQW発光層

5上に、保護層が形成されず、直接、約 $0.15\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層7が形成されている。また、p型クラッド層7上には、約 $0.3\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ のドーピング量および約 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するMgドープ $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{N}$ からなるp型中間層98が形成されている。このp型中間層98の上面上には、約 $0.3\mu\text{m}$ の膜厚を有するとともに、約 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するアンドープ $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層99が形成されている。

【0155】第9実施形態のp型コンタクト層99は、上記のように、アンドープである。この場合、変調ドーピングの効果により、p型中間層98からp型コンタクト層99にホール（正孔）が供給されるので、p型コンタクト層99は、p型の伝導性を示す。なお、p型中間層98は、本発明の「中間層」の一例であり、p型コンタクト層99は、本発明の「コンタクト層」の一例である。

【0156】p型コンタクト層99の上面上には、第1実施形態と同様、約 2nm の膜厚を有するPd膜10aと約 4nm の膜厚を有するAu膜10bとから構成されるp側電極10、および、約 30nm の膜厚を有するTi膜11aと約 500nm の膜厚を有するAu膜11bとから構成されるp側パッド電極11が形成されている。また、一部領域が除去されたn型コンタクト層4の表面には、約 500nm の膜厚を有するAl膜からなるn側電極12が形成されている。

【0157】第9実施形態では、p型クラッド層7とp型コンタクト層99との間に形成された $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{N}$ からなるp型中間層98が、 $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層99のバンドギャップと $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層7のバンドギャップとの中間のバンドギャップを有しているので、p型中間層98により、p型コンタクト層99とp型クラッド層7とのバンドギャップの不連続を緩和することができる。これにより、p型コンタクト層99からp型クラッド層7へ流れる電流に対する抵抗を低減することができる。その結果、発光効率を向上させることができる。

【0158】また、第9実施形態では、第1実施形態と同様、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層99を設けることによって、p型コンタクト層99のキャリア濃度を、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層のキャリア濃度よりも高くすることができる。それによって、p型コンタクト層99とp側電極10との界面のバンド構造を変化させることができる。これにより、p型コンタクト層99と透光性を有するp側電極10とのコンタクト抵抗を小さくす

ることができる。その結果、均一な発光を得ることができる。また、駆動電圧を低くすることができる。

【0159】また、第9実施形態では、第1実施形態と同様、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層99を設けることによって、p型コンタクト層99の電気伝導度を、Ga_{0.85}In_{0.15}Nからなるp型コンタクト層の電気伝導度よりも高くすることができる。これにより、p型コンタクト層99内で電流が均一に広がりやすくなるので、均一な発光を得ることができる。

【0160】次に、図14を参照して、第9実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）の製造方法について説明する。第9実施形態では、保護層を形成せずに、MQW発光層5からp型コンタクト層99までの各層を同一温度で連続して形成する場合の例を示している。

【0161】まず、図14に示すように、第1実施形態と同様の製造プロセスを用いて、サファイア基板1上に、各層2～4を形成する。

【0162】次に、基板温度を約 850°C の単結晶成長温度に保持した状態で、第1実施形態と同様の製造プロセスを用いて、n型コンタクト層4上に、単結晶のアンドープGa_{0.65}In_{0.35}Nからなる井戸層5b（5層）とを交互に成長させることにより、MQW発光層5を形成する。

【0163】ここで、第9実施形態では、引き続き基板温度を約 850°C の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1%～約3%）と、NH₃、TEGaおよびTMAIからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなるドーパントガスとを用いて、約 $3\mu\text{m}/\text{h}$ の成長速度で、MQW発光層5上に、単結晶のMgドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるp型クラッド層7を形成する。

【0164】そして、引き続き基板温度を約 850°C の単結晶成長温度に保持した状態で、H₂およびN₂からなるキャリアガス（H₂：約1%～約3%）と、NH₃、TEGaおよびTMInからなる原料ガスと、Cp₂Mgからなるドーパントガスとを用いて、約 $3\mu\text{m}/\text{h}$ の成長速度で、p型クラッド層7上に、 $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{N}$ からなるp型中間層98を形成する。さらに、p型中間層98上に、約 $3\mu\text{m}/\text{h}$ の成長速度で、アンドープ $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなるp型コンタクト層99を形成する。

【0165】この後、RIE法などを用いて、p型コンタクト層99、p型中間層98、p型クラッド層7、MQW発光層5およびn型コンタクト層4の一部領域をエッチングにより除去する。

【0166】そして、第1実施形態の各電極10～12を形成する際のプロセスと同様のプロセスを用いて、p

型コンタクト層99上に、p側電極10、p型パッド電極11を形成するとともに、エッチングにより露出されたn型コンタクト層4の表面に、n側電極12を形成する。

【0167】最後に、第1実施形態と同様、スクライブ、ダイシングおよびプレーキングなどの方法を用いて、たとえば、一辺の長さが約400 μ mのほぼ正方形のチップ形状に素子分離を行うことにより、図14に示されるような第9実施形態の発光ダイオード素子（青色LEDチップ）が形成される。

【0168】第9実施形態では、上記したように、MQW発光層5およびMQW発光層5上の各半導体層（p型クラッド層7、p型中間層98およびp型コンタクト層99）を同一の雰囲気温度（約850℃）で連続して形成することによって、昇温に起因するMQW発光層5の劣化を防止するための保護層が不要になるので、製造プロセスを簡略化することができる。

【0169】なお、今回開示された実施形態は、すべての点で例示であって、制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した実施形態の説明ではなく特許請求の範囲によって示され、さらに特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれる。

【0170】たとえば、上記第1～第9実施形態では、基板として、サファイア基板を用いたが、本発明はこれに限らず、スピネル基板、Si基板、SiC基板、GaAs基板、GaP基板、InP基板、水晶基板、ZrB₂基板またはGaN基板などの基板を用いてもよい。

【0171】また、上記第1、第3～第5および第8実施形態では、p型コンタクト層を約 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を有するように形成したが、本発明はこれに限らず、p型コンタクト層を、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリア濃度を有するように形成すればよい。このようにすれば、p型コンタクト層と、透光性を有するp側電極とのコンタクト抵抗を容易に小さくすることができる。

【0172】また、上記第1、第2および第6～第9実施形態では、p側電極を約6nmの厚みで形成したが、本発明はこれに限らず、p側電極は、10nm以下の厚みで形成すればよい。このようにすれば、容易に、p側電極に透光性を持たせることができる。

【0173】また、上記第1～第9実施形態では、Pd膜およびAu膜からなるp側電極を、Pd膜とp型コンタクト層とが接触するように形成したが、本発明はこれに限らず、Pd膜の代わりに、ニッケル（Ni）、白金（Pt）、ロジウム（Rh）、ルテニウム（Ru）、オスミウム（Os）およびイリジウム（Ir）のうち、少なくとも一種を含む金属またはこれらの金属からなる合金を用いてもよい。この場合、特に、Ni、Pdまたは白金からなる金属膜をp型コンタクト層と接触するよう

にp側電極を形成すれば、さらに好ましいオーミック接触を得ることができる。

【0174】また、上記第1～第9実施形態では、Pd膜およびAu膜からなるp側電極を、Pd膜とp型コンタクト層とが接触するように形成したが、本発明はこれに限らず、Pd膜の代わりに、水素吸蔵合金を用いてもよい。水素吸蔵合金としては、Mg、 Mg_xNi （ $x \approx 2$ ）、 MgCa 、 Mg_xCu （ $x \approx 2$ ）、 L_2Mg_x （ $x \approx 17$ ）、 CaNi_x （ $x \approx 5$ ）、 LNi_x （ $x \approx 5$ ）、 LCo_x （ $x \approx 5$ ）、 $\text{LNi}_{1-x}\text{Mn}_x$ （ $x \approx 0.5$ ）、 $\text{LNi}_{1-x}\text{Al}_x$ （ $x \approx 0.5$ ）、 TiFe 、 $\text{TiFe}_{1-x}\text{Mn}_x$ （ $x \approx 0.15$ ）、 TiCo 、 $\text{TiCo}_{1-x}\text{Mn}_x$ （ $x \approx 0.5$ ）、 TiCo_xNi_x （ $x \approx 0.25$ ）、 TiMn_x （ $x \approx 1.5$ ）、 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Mn}_{2-y}\text{Mo}_y$ （ $x \approx 0.2$ 、 $y \approx 0.2$ ）、 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Mn}_{2-y-z}\text{V}_y\text{Cr}_z$ （ $x \approx 0.1$ 、 $y \approx 0.2$ 、 $z \approx 0.4$ ）、 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Cr}_{1-y}\text{Mn}_y$ （ $x \approx 0.2$ 、 $y \approx 1.2$ ）、 TiCr_x （ $x \approx 1.8$ ）、 Ti_xCrMn （ $x \approx 1.2$ ）、 $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x$ （ $x \approx 0.25$ ）などが好ましい。ここで、「L」は、希土類元素の混合物であるミッシュメタルまたはランタノイド元素である。また、水素吸蔵合金を形成した後、Au膜を形成する前に、約300℃～約500℃の温度条件下でアニールするのが好ましい。これにより、p型コンタクト層から水素を脱離する効果が大きくなるので、コンタクト層の正孔の濃度を高くすることができる。したがって、さらに好ましいオーミック接触を得ることができる。

【0175】また、上記第1～第9実施形態では、p側電極において、p型コンタクト層と接触するPd膜上にAu膜を形成したが、本発明はこれに限らず、p型コンタクト層と接触する金属膜上に、Au膜の代わりに、亜鉛（Zn）、インジウム（In）、スズ（Sn）およびマグネシウム（Mg）のうち、少なくとも一種を含む酸化物を形成してもよい。具体的には、 ZnO 、 In_2O_3 、 SnO_2 、ITO（InとSnとの酸化物）またはMgOなどの酸化物を形成してもよい。

【0176】また、上記第3～第5実施形態では、p側電極31、41および51を、それぞれ網目状、くし状およびミランダ（meander）状のパターンで形成したが、本発明はこれに限らず、p側電極31、41および51を、これらのパターンの組み合わせ、渦状または島状などのパターンで形成してもよい。

【0177】また、上記第3実施形態では、電極の形成されていない間隙を有するように、網目状のp側電極31を形成したが、本発明はこれに限らず、その間隙に、光を透過可能な厚み（たとえば10nm以下）でp側電極31を形成するとともに、その間隙以外の領域のp側電極31を、光を透過可能な厚みよりも大きい厚みで形成してもよい。

【0178】また、上記第3実施形態では、約20 μ m

の電極幅と、約 $50\mu\text{m}$ の電極間距離を有するように、網目状のp側電極31を形成したが、本発明はこれに限らず、p側電極31の電極間距離を多少大きくした場合にも、p型コンタクト層9のほぼ全面に電流を流すことができる。

【0179】また、上記第3～第5実施形態では、p側電極31、41および51の上面の一部に、それぞれp側パッド電極32、42および52を形成したが、本発明はこれに限らず、大きな厚みで形成されたp側電極31、41および51のシート抵抗は小さいので、p側パッド電極31、41および51の上面の一部に、p側パッド電極32、42および52を形成しなくてもよい。

【0180】また、上記第1～第9実施形態において、窒化物系半導体の結晶構造は、ウルツ鉱型構造であってもよいし、閃亜鉛型構造であってもよい。

【0181】また、上記第1～第9実施形態では、窒化物系半導体各層の結晶成長を、MOVPE法などを用いて行ったが、本発明はこれに限らず、HVPE法、または、TMAI、TMGa、TMIn、 NH_3 、 SiH_4 および Cp_2Mg などを原料ガスとして用いるガスソースMBE法などを用いて結晶成長を行ってもよい。

【0182】また、上記第1～第9実施形態では、窒化物系半導体各層の結晶成長を、約 1150°C または約 850°C の単結晶成長温度で行ったが、本発明はこれに限らず、約 1000°C ～約 1200°C または約 700°C ～約 1000°C の単結晶成長温度範囲で結晶成長を行ってもよい。

【0183】また、上記第1～第9実施形態では、p型クラッド層からp型コンタクト層を結晶成長する際に、キャリアガスの水素組成を低くすることにより、Mgドーパントを活性化させて、高キャリア濃度のp型半導体各層（第1実施形態および第3～第5実施形態では、各層7～9、第2実施形態では、各層7、8および19、第6実施形態では、各層66、67、68および69、第7実施形態では、各層77、78および79、第8実施形態では、各層7、88および89、第9実施形態では、各層7、98および99）を形成したが、本発明はこれに限らず、p型半導体各層を N_2 雰囲気中で、約 600°C ～約 800°C の温度範囲で熱処理してもよい。このようにすれば、高キャリア濃度のp型半導体各層を形成することができる。

【0184】また、上記第1～第9実施形態では、GaNよりバンドギャップの小さいGaInNを用いてp型コンタクト層を形成したが、本発明はこれに限らず、GaInN以外の他のGaNよりバンドギャップの小さい材料を用いてp型コンタクト層を形成してもよい。たとえば、GaTlNおよびGaInTlなどのTlを含む窒化物系半導体や、GaAsN、GaInAsN、GaNpおよびGaInNpなどのAsやPを含む窒化物系

半導体を用いて形成してもよい。ただし、p型コンタクト層は、GaInNを用いる場合に最も作製しやすい。

【0185】また、上記第1～第9実施形態では、GaInN単層を用いてp型コンタクト層を形成したが、本発明はこれに限らず、GaNよりバンドギャップの小さいGaInNなどからなる層を少なくとも1層含む超格子で形成してもよい。超格子の構成は、たとえば、数nmの厚みを有する $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ の層と数nmの厚みを有する $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{N}$ （ここで、 $x>y>0$ ）の層との積層構造や、数nmの厚みを有するGaInNの層と数nmの厚みを有するAlGaIn（GaNを含む）の層との積層構造を用いればよい。ここで、p型不純物は、バンドギャップの大きい層にのみドーピングする変調ドーピング構造でもよく、バンドギャップの小さい層にのみドーピングしてもよく、または、両方の層にドーピングしてもよい。

【0186】また、上記第1～第9実施形態では、クラッド層とコンタクト層との間にGaInN、AlGaInまたはGaNからなる中間層を形成したが、本発明はこれに限らず、クラッド層のバンドギャップとコンタクト層のバンドギャップとの中間のバンドギャップを実質的に有する材料からなる中間層を用いてもよい。また、クラッド層については、特に、AlGaInのようにGaNよりも大きなバンドギャップを有する窒化物系半導体であるのが好ましい。

【0187】また、上記第1～第9実施形態では、p型のドーパントとして、Mgを用いたが、本発明はこれに限らず、Be、Ca、Sr、Ba、Zn、CdまたはHgなどをp型のドーパントとして用いてもよい。

【0188】また、上記第1～第9実施形態では、窒化物系半導体の各層は窒化物系半導体の（0001）面上に積層したが、本発明はこれに限らず、窒化物系半導体の他の方向に積層してもよい。たとえば、窒化物系半導体の（1-100）や（11-20）面などの（H、K、-H-K、0）面上に、窒化物系半導体の各層を積層してもよい。この場合、発光層にピエゾ電場が発生しないので、発光層の発光効率を向上させることができる。

【0189】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、低い駆動電圧で均一な発光を得ることが可能な窒化物系半導体発光素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）を示した断面図である。

【図2】図1に示した発光ダイオード素子（青色LEDチップ）の上面図である。

【図3】本発明の第2実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）を示した断面図である。

【図4】本発明の第2実施形態による発光ダイオード素

子（紫外LEDチップ）の形成方法を説明するための断面図である。

【図5】本発明の第2実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の形成方法を説明するための断面図である。

【図6】本発明の第2実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）の形成方法を説明するための断面図である。

【図7】本発明の第3実施形態による発光ダイオード素子の上面図である。

【図8】本発明の第4実施形態による発光ダイオード素子の上面図である。

【図9】本発明の第5実施形態による発光ダイオード素子の上面図である。

【図10】本発明の第6実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）を示した断面図である。

【図11】図10に示した発光ダイオード素子（紫外LED *

* EDチップ）の上面図である。

【図12】本発明の第7実施形態による発光ダイオード素子（紫外LEDチップ）を示した断面図である。

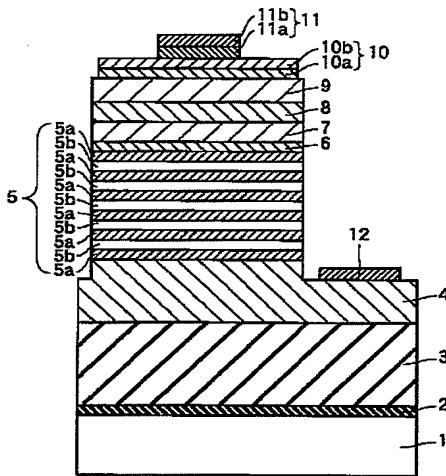
【図13】本発明の第8実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）を示した断面図である。

【図14】本発明の第9実施形態による発光ダイオード素子（青色LEDチップ）を示した断面図である。

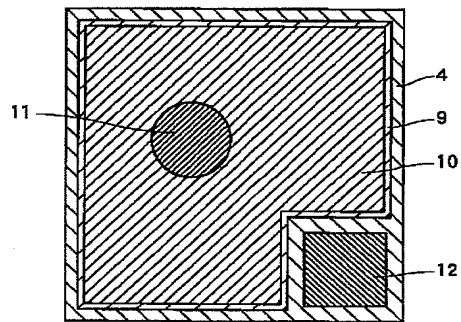
【符号の説明】

- 1、21 サファイア基板（基板）
- 4 n型コンタクト層（第1窒化物系半導体層）
- 5、15 MQW発光層（発光層）
- 7、67、77 p型クラッド層（第2窒化物系半導体層；クラッド層）
- 8、68、78、88、98 p型中間層（中間層）
- 9、19、69、79、89、99 p型コンタクト層（コンタクト層）
- 10、31、41、51 p側電極（電極）

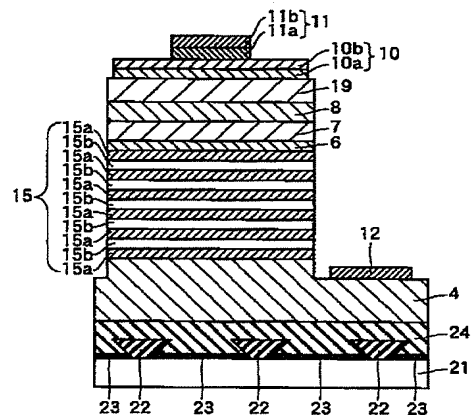
【図1】



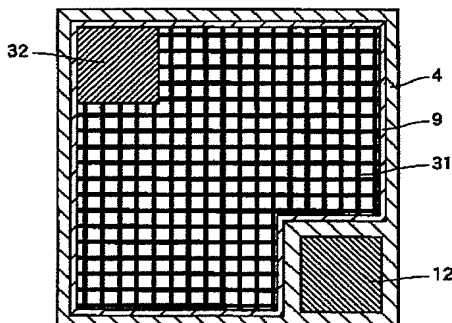
【図2】



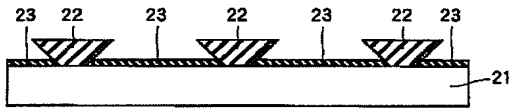
【図3】



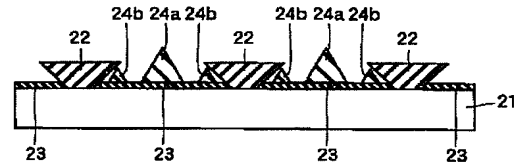
【図7】



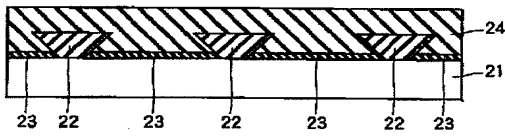
【図4】



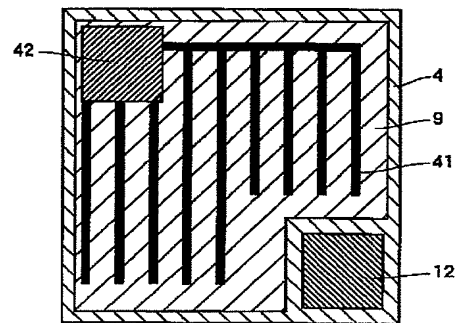
【図5】



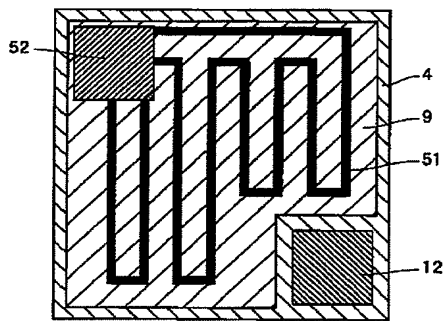
【図6】



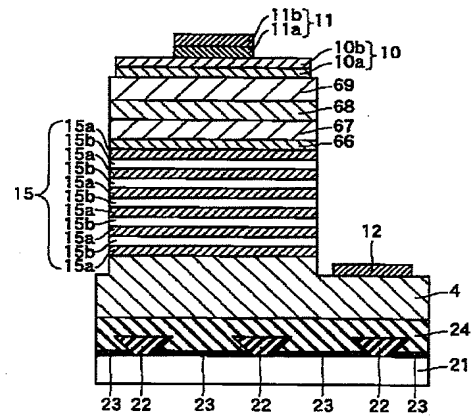
【図8】



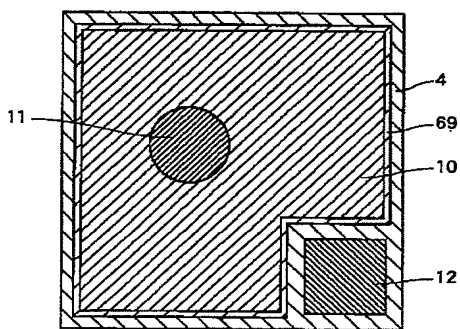
【図9】



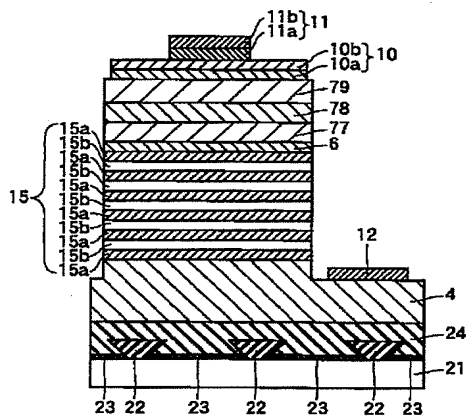
【図10】



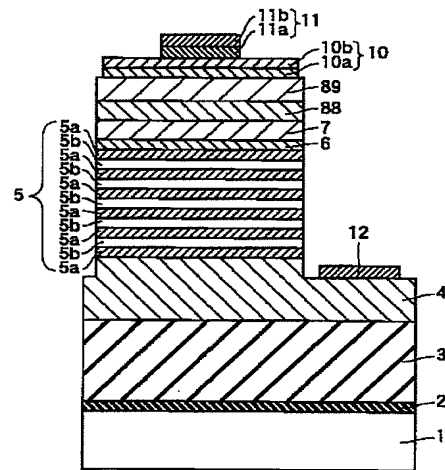
【図11】



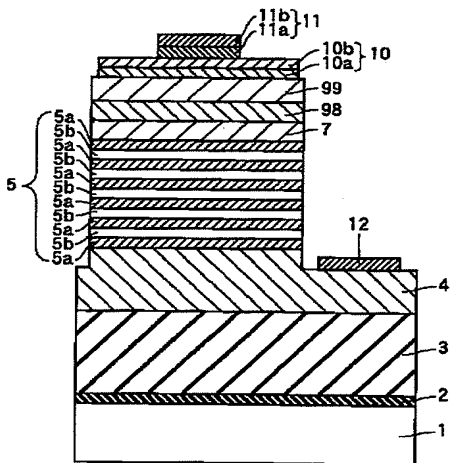
【図12】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

(72)発明者 竹内 邦生
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三
洋電機株式会社内
(72)発明者 山口 勤
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三
洋電機株式会社内

(72)発明者 狩野 隆司
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三
洋電機株式会社内
Fターム(参考) 4M104 AA04 BB02 BB07 BB14 CC01
GG04 HH15
5F041 AA05 AA24 CA04 CA05 CA40
CA83 CA88 CA92 CA99